

COMPARACIÓN DE MODELOS PARA DETERMINAR LA MÁXIMA PRESIÓN LATERAL EN HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES

Comparison between the experimental models to determine the maximum lateral pressure in self-compacting concrete

Sofía Teixeira¹, Adrián Santilli², Iñigo Puente³

Recibido: Marzo 2013

Aceptado: Mayo 2013

Resumen.- El diseño de encofrados verticales depende de la predicción de la máxima presión lateral ejercida por el hormigón en estado fresco. En este trabajo se describen los modelos experimentales descritos en la bibliografía para predecir la máxima presión lateral ejercida por el hormigón autocompactante (HAC) en encofrados verticales y se realiza una comparación de los mismos frente a dos casos experimentales recopilados en la bibliografía; para columnas de pequeña y gran altura. Por lo tanto, se presentan dos objetivos fundamentales: en primer lugar justificar el uso de modelos que necesiten la determinación de un parámetro reológico para predecir la máxima presión lateral ejercida por HAC y en segundo lugar determinar el modelo que mejor se adecua a la máxima presión experimental.

Palabras claves: Hormigón autocompactante (HAC); modelos experimentales, presión lateral, encofrados verticales.

Summary.- *The design of vertical formwork is dependent on the prediction of the maximum lateral pressure exerted by fresh concrete. This work describes the experimental models formulated in the bibliography to predict maximum lateral pressure exerted by Self-compacting concrete (SCC) on vertical formworks and it performs a comparison of them against two experimental cases recompiled from the bibliography; columns of major and small heights. Therefore, this article has two main objectives, firstly intent to justify the use of the models which need a rheological parameter to predict the maximum lateral pressure exerted by SCC, and secondly intent to determine the model that best fits to the maximum experimental lateral pressure.*

Keywords: *Self-compacting concrete (SCC); experimental models, lateral pressure, vertical formwork.*

1. Introducción.- El empleo de un hormigón que se pueda colocar sin utilizar ningún medio de compactación y que pueda llenar los moldes por gravedad sin sufrir ningún tipo de segregación ni otros defectos en el hormigonado, nace de la inquietud del profesor Okamura en Japón. Es así que en 1983, inaugura el desarrollo de esta línea de investigación, obteniendo en 1988 un prototipo de hormigón colocable en obra sin requerir medidas de compactación alguna. La norma EHE-08 [1] define como HAC, a aquel hormigón que presenta una dosificación que le permite compactarse sin la necesidad de ningún tipo de vibración.

Dos son los campos privilegiados de aplicación para este tipo de hormigón: las estructuras complejas con una gran densidad de armaduras y el hormigón prefabricado, ya que el HAC

¹ Ingeniera Civil. TECNUN, Universidad de Navarra, steixeira@tecnun.es

² Doctor Ingeniero. Facultad de Ingeniería, Universidad de Montevideo, asantilli@um.edu.uy

³ Doctor Ingeniero Industrial. TECNUN, Universidad de Navarra, ipuente@tecnun.es

elimina la compactación manual y permite rellenar perfectamente los moldes o encofrados dando una terminación superficial de gran calidad sin la necesidad de realizar ningún tipo de vibrado. Sin embargo, actualmente también se va incrementando, el empleo de *HAC* para la realización de estructuras convencionales.

Como se determina desde su condición de autocompactibilidad las propiedades que debe cumplir el *HAC* son:

- Fluidez o habilidad de fluir sin ayuda externa y llenar el encofrado.
- No presentar segregación o indicios de bloqueo.
- Estabilidad dinámica y estática.

Los materiales componentes del *HAC* son los mismos que en los hormigones vibrados convencionalmente (HV). La diferencia radica en su proporción y en la inclusión de aditivos. La fabricación del mismo requiere más control, ya que el *HAC* es más sensible. El *HAC* se caracteriza por un menor contenido de árido grueso, un mayor contenido de finos, mayor volumen de pasta (finos + agua). En la Figura I se observa la comparación de proporciones típicas para los dos tipos de hormigones.

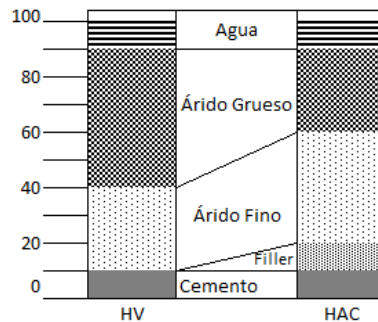


Figura I.- Dosificación según el tipo de hormigón.

Los aditivos químicos son un componente imprescindible del *HAC* pues sin su incorporación no sería factible su confección. Sin ellos, la única forma posible de aumentar la fluidez tendría que ser incrementando la cantidad de agua, lo que generaría consecuencias negativas sobre la resistencia, la porosidad e, incluso sobre la estabilidad del hormigón.

La calidad del *HAC* está determinada por su comportamiento reológico y su tixotropía [2]. Según Barnes et al. [3] la tixotropía es una disminución gradual de la viscosidad bajo la aplicación de un esfuerzo cortante seguida de una recuperación gradual de la misma cuando se elimina dicho esfuerzo.

La tixotropía del hormigón influye en varios aspectos durante la etapa de llenado del encofrado, pero una de las consecuencias más importantes es la determinación de la envolvente de presión lateral ejercida sobre el encofrado. La magnitud de dicha presión es necesaria para el diseño de los encofrados, ya que una sobreestimación de la misma aumentará los costos de construcción. De acuerdo con Hanna y Senouci [4] este aumento puede representar hasta un 60% del costo de la estructura de hormigón, lo que es reafirmado por Hurd [5].

Además de la alta influencia de la tixotropía en el desarrollo de la presión lateral sobre el encofrado, existen varios factores, que también influyen en el valor de la presión lateral máxima. La literatura clasifica estos factores en tres categorías: características de los encofrados, características del hormigón y características de colocación. Son varios los investigadores que estudiaron estas variables [6–9].

Cada categoría contiene un gran número de factores, que explican la complejidad del problema. Por lo tanto, en la actualidad, no existe un modelo aceptado para predecir la presión lateral del hormigón fresco ejercida sobre el encofrado en el caso de HACs. En este trabajo se describen los modelos formulados en la bibliografía para predecir la máxima presión lateral ejercida por los HACs sobre los encofrados y se busca determinar cuál es el modelo que mejor se adecúa a la máxima presión lateral medida in situ.

2. Modelos presentes en la literatura para determinar la envolvente máxima de presión lateral en HAC.- En este trabajo se describen cinco modelos para determinar la envolvente de la presión lateral para el caso de HAC.

2.1. Presión hidrostática.- Es el modelo más conservador y tradicional, debido a que considera al hormigón en estado fresco como un fluido. Establece que, se debe dimensionar el encofrado para poder soportar una presión lateral igual a la distribución hidrostática de un líquido de igual densidad que el hormigón.

2.2. Vanhove et al. (2004) [10].- Los autores emplean una analogía con la teoría de Janssen [11] para determinar la presión de los granos sobre las paredes de los silos; adaptándola al cálculo de la presión lateral del hormigón ejercida sobre el encofrado. Esta estimación de cálculo considera al hormigón como un material continuo y asume que la presión horizontal es proporcional a la vertical, donde el factor de proporcionalidad K es constante para toda la altura y el cual depende del ángulo de fricción interno del material φ . Otra consideración en el modelo de Janssen [11], es considerar que la fricción del hormigón contra las paredes del encofrado se rige por la ley de Coulomb, considerándose constante el coeficiente de fricción μ . La Ec. (1) determina la distribución de presión lateral en función de la altura del encofrado.

$$P_{max} = \frac{\rho g A - \alpha \tau_0 (2e + 2L)}{\alpha (2e + 2L) \mu K} \left(1 - e^{-\frac{\alpha (2e + 2L) \mu K}{A} H} \right) \quad (1)$$

2.3. Ovarlez y Roussel (2005) [12].- Los autores proponen un modelo físico teórico que caracteriza al HAC por su tensión de fluencia τ_0 , siendo esta una función creciente del tiempo en reposo. A modo de simplificación, consideran el criterio de plasticidad de Tresca; es decir que τ_0 es el esfuerzo cortante máximo sostenible por un plano interno. Además, suponen que en tensiones por debajo de esta, el HAC se comporta como un material elástico y que la tensión de fricción en las paredes del encofrado pueden tomar valores comprendidos entre cero y τ_0 , siendo esta una de las principales diferencias con el modelo propuesto por Vanhove et al. [10]. La presión lateral puede determinarse a partir de las Ecs. (2).

Para un encofrado rectangular:

$$P_H = K \left[\rho g H - \frac{(H-e)^2 A_{thix}}{eR} \right] \quad (2a)$$

Si el encofrado es circular:

$$P_H = K \left[\rho g H - \frac{(H-r)^2 A_{thix}}{rR} \right] \quad (2b)$$

2.4. Khayat y Omran(2009) [13].- Los autores determinan el valor de la máxima presión lateral utilizando un modelo estadístico a partir de datos experimentales obtenidos de una columna de PVC de 200 mm de diámetro y 0,7 m de altura. En los ensayos se llenaron los 50 cm inferiores del encofrado con HAC y luego se simularon diferentes alturas de posibles encofrados mediante inyección de aire a presión, llegando así a los 13 metros de altura.

Los autores determinan la máxima presión lateral a partir de una relación entre la presión lateral y la vertical. En el modelo propuesto se describen dos posibles métodos empíricos para poder determinar los valores de la tensión de fluencia del HAC en reposo, estos son: Vano Portátil [14] y Plano Inclinado [15], resultando así dos métodos analíticos para determinar la relación entre la presión horizontal y la vertical, los cuales se expresan en las Ecs. (3) y (4).

$$K = \left[112 - 3,8H + 0,63R - 0,6T + 0,1D_{min} - 0,021VP_{\tau_{0_{rest15mins}}} \right] f_{MSA} f_{WT} \quad (3)$$

De igual manera se desarrolla un modelo analítico para determinar la tensión de fluencia en reposo a los quince minutos con el plano inclinado ($PI_{\tau_{0_{rest15mins}}}$), esto resulta en la Eq. (4).

$$K = \left[98 - 3,82H + 0,63R - 0,6T + 0,11D_{min} - 0,021PI_{\tau_{0_{rest15mins}}} \right] f_{MSA} f_{WT} \quad (4)$$

2.5. DIN 18218-10 [16].- La norma alemana DIN 18218-10 se basa en la investigación realizada por Proske y Graubner [17] y Proske [18], en la cual proponen un modelo bilineal de distribución de la presión lateral ejercida por el HAC al encofrado. El modelo presenta una distribución hidrostática hasta llegar al valor máximo determinado con sus correspondientes parámetros en la Eq. (5) y luego se mantiene constante hasta el final del encofrado. Destacar que en este caso el valor de presión máxima tampoco puede superar el valor de la presión hidrostática de un líquido con igual densidad que el hormigón.

$$P_{max} = 25 + 33RK_D \geq 30 \quad (5)$$

Donde:

R es la velocidad de llenado.

K_D es el factor que considera el comportamiento del HAC según el tiempo de fraguado.

Las Eq. (5) es válida cuando la temperatura del hormigón es de 15°C, con un peso específico de 25 kN/m³ y una velocidad de llenado menor a 7,0 m/h. De lo contrario, la normativa establece coeficientes de corrección para la determinación de la presión lateral.

3. Discusión.- Los modelos anteriormente descritos generalmente necesitan un reómetro o un ensayo de laboratorio específico, como en el caso del modelo propuesto por Khayat y Omran [13] (vano portátil [14] y plano inclinado [15]), para determinar al menos uno de los parámetros necesarios en cada uno de los modelos. Debido a que los reómetros tienen un precio elevado y los ensayos no resultan prácticos para ser realizados en la obra. En esta discusión son utilizados los parámetros obtenidos en una investigación realizada recientemente en San Sebastián - España en TECNUN-Universidad de Navarra. En la Tabla I se resumen los resultados de esta investigación.

Modelo	Parámetro	Valor	Unidad
Venhove et al.	μ	0,043	T/m ²
Ovarlez y Roussel	Athix	0,27	Pa/s
Khayat y Omran	VPr0rest15mins	700	Pa

Tabla I.- Resultado de cada parámetro en base al análisis de sensibilidad realizado en TECNUN – Universidad de Navarra.

4. Comparación de los modelos.- La comparación entre los diferentes modelos fue realizada teniendo en cuenta la máxima presión lateral otorgada por cada uno de los modelos; considerando los parámetros detallados en el punto anterior.

Para poder realizar la comparación anterior se consideraron dos columnas presentes en la bibliografía: una de pequeña altura (alturas menores a 4 metros) y otra de gran altura. En cada caso se determinó la envolvente de presión máxima otorgada por cada modelo y se procedió a la comparación de las mismas entre sí y con la máxima presión lateral medida en obra.

En el primer caso se determina la envolvente de máxima presión lateral para una columna de sección circular de 0,92 metros de diámetro y 3,6 metros de altura, ensayada por Khayat y Assaad [19], a una velocidad de 10 m/h, en donde la máxima presión lateral ejercida por el HAC sobre el encofrado fue de 82,1 kPa.

Aplicando cada uno de los modelos a dicha columna (utilizando los datos resumidos en la Tabla 1) resultan las envolventes de presión lateral que se muestran en la Figura II.

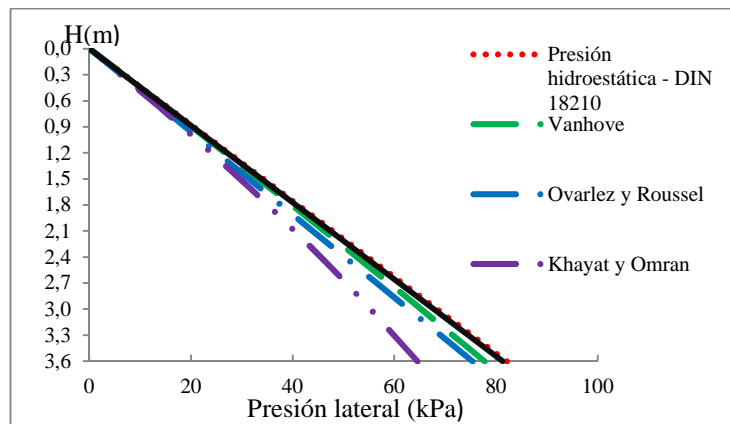


Figura II.- Envolventes de presión lateral según los diferentes modelos en columna de 3,6 m de altura.

Como se observa en la Figura II, la envolvente de la presión lateral determinada experimentalmente se representa de forma lineal, debido a que el dato experimental es muy próximo a la presión hidrostática en dicha profundidad.

En la Figura II también se puede apreciar que la mayoría de los modelos para pequeñas alturas, al igual que la distribución hidrostática, tienden a realizar una predicción muy aproximada de la máxima presión lateral obtenida experimentalmente, lo cual no justifica el uso de modelos experimentales con necesidad de determinar parámetros reológicos para su determinación.

Por otro lado, en el caso de columnas de grandes alturas se consideró el ensayo realizado por Giammatteo et al. [20]. El autor ensaya una columna de 9,0 metros de altura con sección rectangular de 2,5x0,3 m. a una velocidad de 4,0 m/h resultando en la misma una presión máxima de 123 kPa.

Aplicando cada uno de los modelos a dicha columna resulta una envolvente de presión según se detalla en la Figura III.

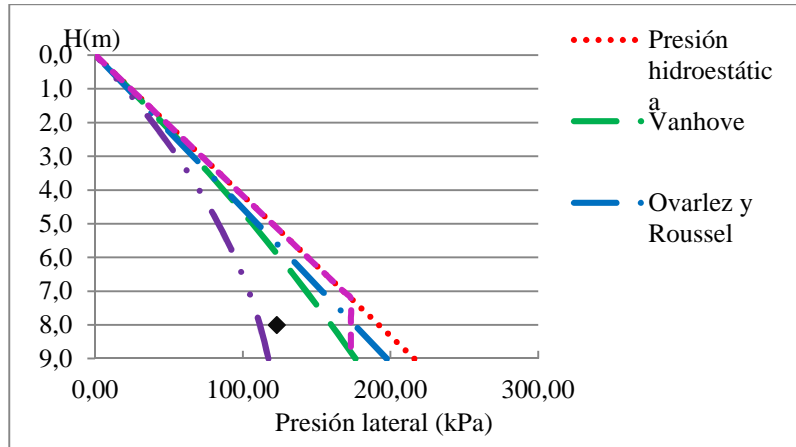


Figura III.- Envolventes de presión lateral según los diferentes modelos resultantes en columna de 9,0 m altura.

Como se observa en la Figura III, se ha representado únicamente el dato experimental de la presión máxima registrada por el sensor ubicado a un metro de la base, con una cruz debido a que su variación con la distribución hidrostática es considerable para la altura estudiada.

En la Figura III también se puede apreciar que para profundidades mayores a 4 m aproximadamente, los modelos empiezan a tener un comportamiento diferente, separándose de la distribución hidrostática. De esta manera se determina que el dato experimental analizado, el modelo propuesto por Khayat y Omran [13] parece ser el más adecuado.

5. Conclusiones.- En base al análisis realizado se puede concluir:

- 1) Para determinar la máxima presión lateral para hormigones autocompactantes es necesario determinar un parámetro reológico, los cuales no son habituales en obra.
- 2) Para alturas pequeñas (aproximadamente menores a 4 m), en base al ejemplo analizado la máxima presión lateral para el hormigón autocompactante puede ser considerada igual a la distribución hidrostática, debido a la gran similitud que presentan todos los modelos.
- 3) La aplicación de un modelo se justifica cuando la altura de la columna es importante.

6. Nomenclatura.

α : Coeficiente que se introduce para considerar las imperfecciones.

τ_0 : Tensión de fluencia del hormigón (Pa)

μ : Coeficiente de fricción (kg/m^2)

ρ : Densidad del hormigón (kg/m^3)

ϕ : Ángulo de fricción interna del material ($^\circ$)

e: Espesor del encofrado (m)

f_{MSA} : Factor de corrección referente al diámetro máximo del árido

f_{WT} : Factor de corrección referente al tiempo de espera entre tongadas

g: Constante de aceleración universal

r: Radio del encofrado (m)

A: Área transversal (m²)

A_{thix} : Coeficiente de floculación (Pa/s)

D_{min} : Dimensión mínima del encofrado (mm)

H: Altura de llenado del encofrado (m)

HAC: Hormigón autocompactante

HV: Hormigón vibrado convencionalmente

K: Relación entre la presión lateral y vertical

L: Ancho del encofrado (m)

$PI_{\tau_{0rest15mins}}$: Tensión de fluencia del hormigón medida en el plano inclinado luego de 15 minutos de reposo (Pa)

R: Velocidad de llenado (m/hr)

T: Temperatura del hormigón (°C)

$VP_{\tau_{0rest15mins}}$: Tensión de fluencia del hormigón medida en el vano portátil luego de 15 minutos de reposo (Pa)

7. Bibliografía.

- [1] EHE., "Instrucción del Hormigón Estructural - Anejo 17," 2008.
- [2] G. H. Tattersall and P. F. G. Banfill, "The rheology of fresh concrete," 1989.
- [3] H. A. Barnes, J. F. Hutton, and K. Walters, "An Introduction to Rheology," 1989.
- [4] A. S. Hanna and A. B. Senouci, "Material Cost Minimization Wall Forms," *Building and Environment*, vol. 32, no. 1, pp. 57–67, 1997.
- [5] M. Hurd, "Formwork for concrete.," *American Concrete Institute*, 2005.
- [6] C. Djelal, Y. Vanhove, P. De Caro, and A. Magnin, "Role of demoulding agents during self-compacting concrete casting in formwork," vol. 35, no. October, pp. 470–476, 2002.
- [7] A. H. Bakhtiarain, "Effect of concrete temperature and formwork width on variation pressure formwork of Self-Compacting Concrete," pp. 1–9, 2011.
- [8] E. P. Koehler, L. Keller, and N. J. Gardner, "Field Measurements of SCC rheology and formwork pressures," pp. 1–6, 2007.
- [9] J. H. Kim, N. Noemi, and S. P. Shah, "Effect of powder materials on the rheology and formwork pressure of self-consolidating concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 6, pp. 746–753, Jul. 2012.
- [10] Y. Vanhove, C. Djelal, and A. Magnin, "Prediction of the lateral pressure exerted by Self-Compacting Concrete on formwork." 2004.
- [11] H. Janssen, "Versuch über Getreidedruck in SillozeUen.," *VDI Zeitschrift*, vol. 39, pp. 1045–1049, 1895.
- [12] G. Ovarlez and N. Roussel, "A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork," pp. 1–9, 2005.
- [13] H. Khayat and A. F. Omran, "Evaluation of SCC Formwork Pressure," no. August, 2009.
- [14] A. F. Omran, S. Naji, and K. H. Khayat, "Portable Vane Test to Assess Structural Buildup at Rest of Self-Consolidating Concrete," no. 108, 2011.
- [15] H. Khayat, A. F. Omran, and T. V Pavate, "Inclined Plane Test to Evaluate Structural Buildup at Rest of Self-Consolidating Concrete," no. 107, pp. 515–522, 2010.

- [16] DIN 18218., “Frischbeton auf Lotrechte Schalungen (Pressure of concrete on vertical formwork).” 2010.
- [17] T. Proske and C. Graubner, “-Self-Compacting Concrete - Pressure on formwork and ability to deaerate.,” vol. 17, no. 2002, pp. 1–15, 2002.
- [18] T. Proske, “Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton. Ein wirklichkeitsnahes Modell zur Bestimmung der Einwirkungen auf Schalung und Rüstung.,” 2007.
- [19] K. Khayat, J. Assaad, H. Mesbah, and M. Lessard, “Effect of section width and casting rate on variations of formwork pressure of self-consolidating concrete,” *Materials and Structures*, vol. 38, no. 275, pp. 73–78, Dec. 2003.
- [20] M. M. Giammatteo, a. Gregori, and G. Totani, “In-situ measurement of formwork pressures generated by Self-Compacting Concrete,” *Computational Methods and Experimental Measurements XIII*, vol. I, pp. 851–860, Jun. 2007.